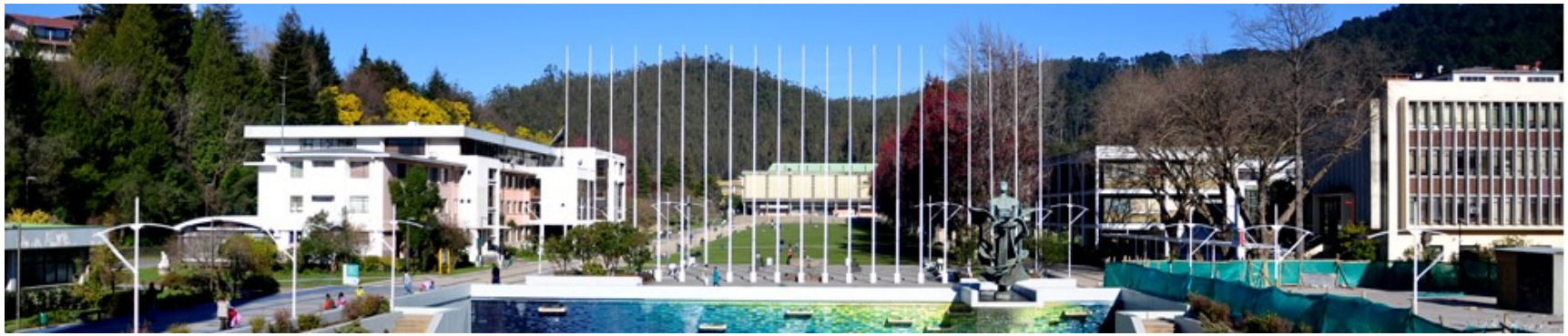
Fundamentos de Tribología

Rodamientos 1



Gabriel Barrientos. 06/2026

RODAMIENTOS

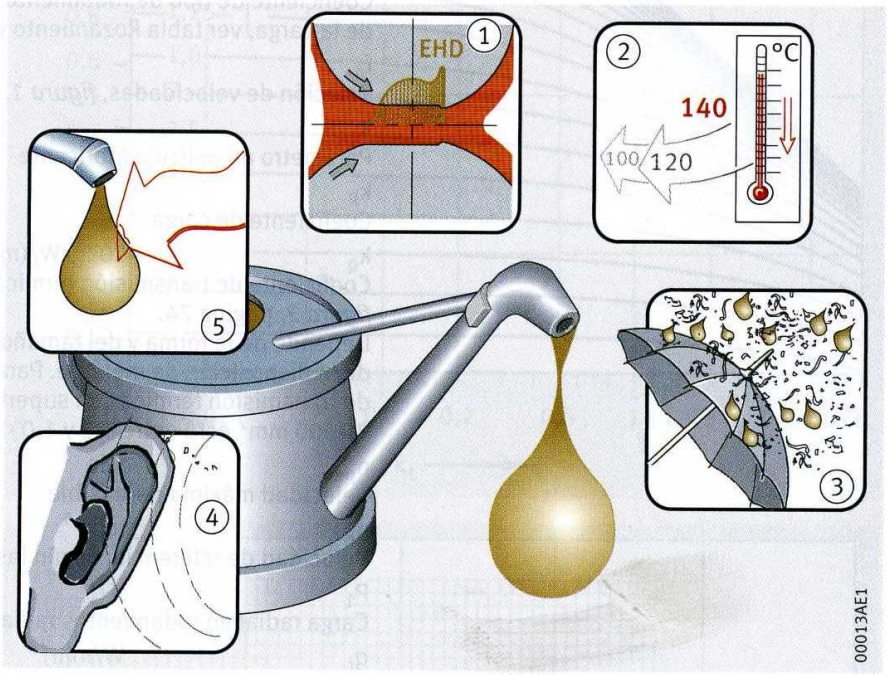
Fundamentos

Una lubricación correcta y un mantenimiento regular son importantes para un funcionamiento fiable y una prolongada duración de vida de los rodamientos.

Función del lubricante

El lubricante sirve para, *figura 1*:

- Formar una película lubricante con suficiente capacidad de carga entre las superficies en contacto y evitar, de esta forma, el desgaste y la fatiga prematuras ①
- En la lubricación con aceite, evacuar el calor ②
- En la lubricación con grasa, obturar el rodamiento hacia el exterior para evitar que penetre suciedad sólida o líquida ③
- Amortiguar el ruido de funcionamiento ④
- Proteger contra la corrosión ⑤.



① Formar una película lubricante capaz de absorber carga

② En la lubricación con aceite, evacuar el calor

③ En la lubricación con grasa, obturar el rodamiento hacia el exterior contra las impurezas

④ Amortiguar el ruido de funcionamiento

⑤ Proteger contra la corrosión

Figura 1
Función del lubricante

Prevenga el 60% de los fallos prematuros de los rodamientos

El Programa de Funcionamiento Sin Problemas TFO se compone de una gama de productos y servicios de calidad diseñados para ayudar a reducir los fallos en los rodamientos, y por tanto incrementar la eficacia y fiabilidad de la maquinaria en las fábricas.

16 %

Montaje deficiente

Alrededor del 16% de todos los fallos prematuros de los rodamientos son causados por montajes deficientes o inadecuados (normalmente por el uso de la fuerza bruta...) ignorando la disponibilidad de las herramientas correctas para el montaje. La instalaciones pueden requerir métodos mecánicos hidráulicos y de calentamiento para el correcto montaje y desmontaje. SKF le ofrece una gama completa de herramientas para hacer más fáciles, rápidas y rentables dichas tareas, además de un eficaz servicio 'know-how' de ingeniería. Los montajes profesionales, usando técnicas y herramientas especializadas, es otro paso hacia delante en la consecución de la máxima disponibilidad de las máquinas.

36 %

Lubricación insuficiente

Aunque los rodamientos lubricados 'de por vida' se montan sin precisar mantenimiento posterior, cerca del 36% de los fallos prematuros de todos los rodamientos son causados por especificaciones y aplicaciones incorrectas de los lubricantes. Inevitablemente, cualquier rodamiento sin una correcta lubricación fallará antes de su vida nominal de servicio. Ya que los rodamientos son a menudo uno de los componentes de más difícil acceso en la maquinaria, una lubricación inadecuada supone habitualmente problemas complejos. En aquellas aplicaciones donde los manuales de mantenimiento no ayudan en exceso, pueden ser indicados sistemas de lubricación automática SKF para una lubricación óptima. La lubricación efectiva, usando sólo grasas, herramientas y técnicas SKF, le ayudarán a reducir significativamente el tiempo de parada de sus máquinas.

14 %

Contaminación

Un rodamiento es un componente de precisión que no funcionará correctamente a no ser que esté lubricado y aislado de toda contaminación. Y ya que los rodamientos lubricados de por vida con grasa (obturados) constituyen sólo una pequeña proporción de todos los rodamientos en uso, al menos el 14% de todos los fallos prematuros son atribuibles a problemas causados por contaminación. SKF puede diseñarle a medida la mejor solución de obturaciones para los entornos de trabajo más duros.

34 %

Fatiga

Allí donde las máquinas están sobrecargadas y/o incorrectamente revisadas, los rodamientos sufren las consecuencias, resultando fallos prematuros en un 34% de los casos. Los fallos repentinos e imprevistos se pueden evitar ya que los rodamientos con poco manteniminto o sobrecargados emiten señales de preaviso, las cuales pueden ser detectadas e interpretadas usando equipos de control y supervisión SKF. La gama SKF incluye instrumentos de mano, sofisticados sistemas y programas informáticos de gestión de datos para el monitorizado periódico o contínuo de los parámetros clave.

Tipo de rodamiento	Grasa	Aceite
Rígido de bolas	340.000	500.000
De rodillos cilíndricos	300.000	500.000
De bolas y de rodillos a rótula	145.000	290.000
Axiales de bolas y de rodillos	140.000	280.000

La velocidad de un rodamiento se puede clasificar dentro de los siguientes rangos:

Baja < 50 rpm

Media de 50 a 500 rpm

Alta > 500 rpm

4.2. Lubricacción

La lubricación correcta de un rodamiento está basada en condiciones elastohidrodinámicas (EHL) ya que por la configuración del tipo de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura se dificulta la formación de una película hidrodinámica pura.

La lubricación EHL para los rodamientos depende de la velocidad, la carga, la viscosidad del aceite, el método de lubricación y la temperatura de operación. El espesor de la película lubricante se incrementa al aumentar la carga o la temperatura de operación.

4.2.1. Velocidad de operación

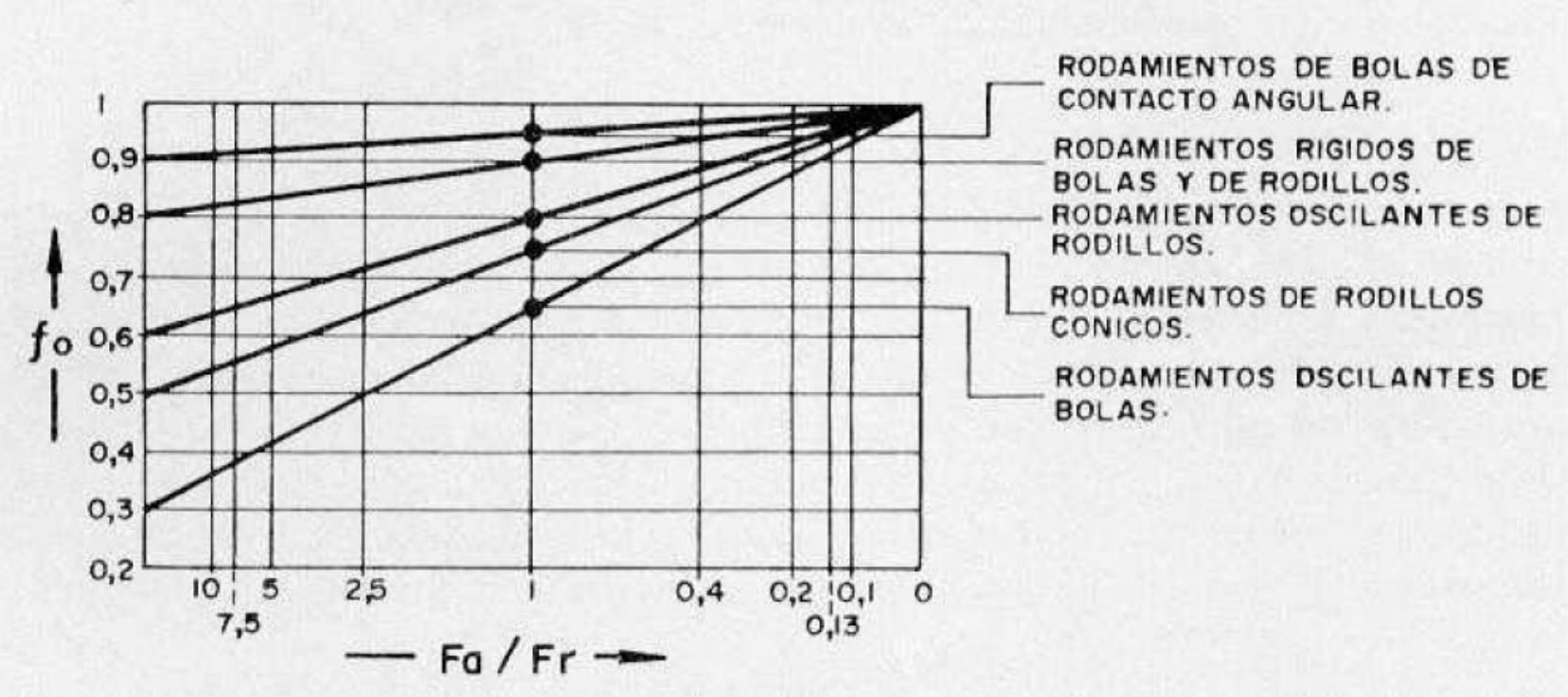
Velocidades de operación muy bajas generan un espesor de película lubricante EHL inadecuado y las altas velocidades pueden ocasionar una distribución anormal de la carga sobre los elementos rodantes, haciendo que se concentre más sobre un elemento y por otro lado, la fuerza centrífuga puede llegar a expulsar el lubricante de la zona de contacto, dando lugar a una lubricación ineficiente.

$$\text{factor de velocidad } nd_m$$

$$d_m = (D + d)/2$$

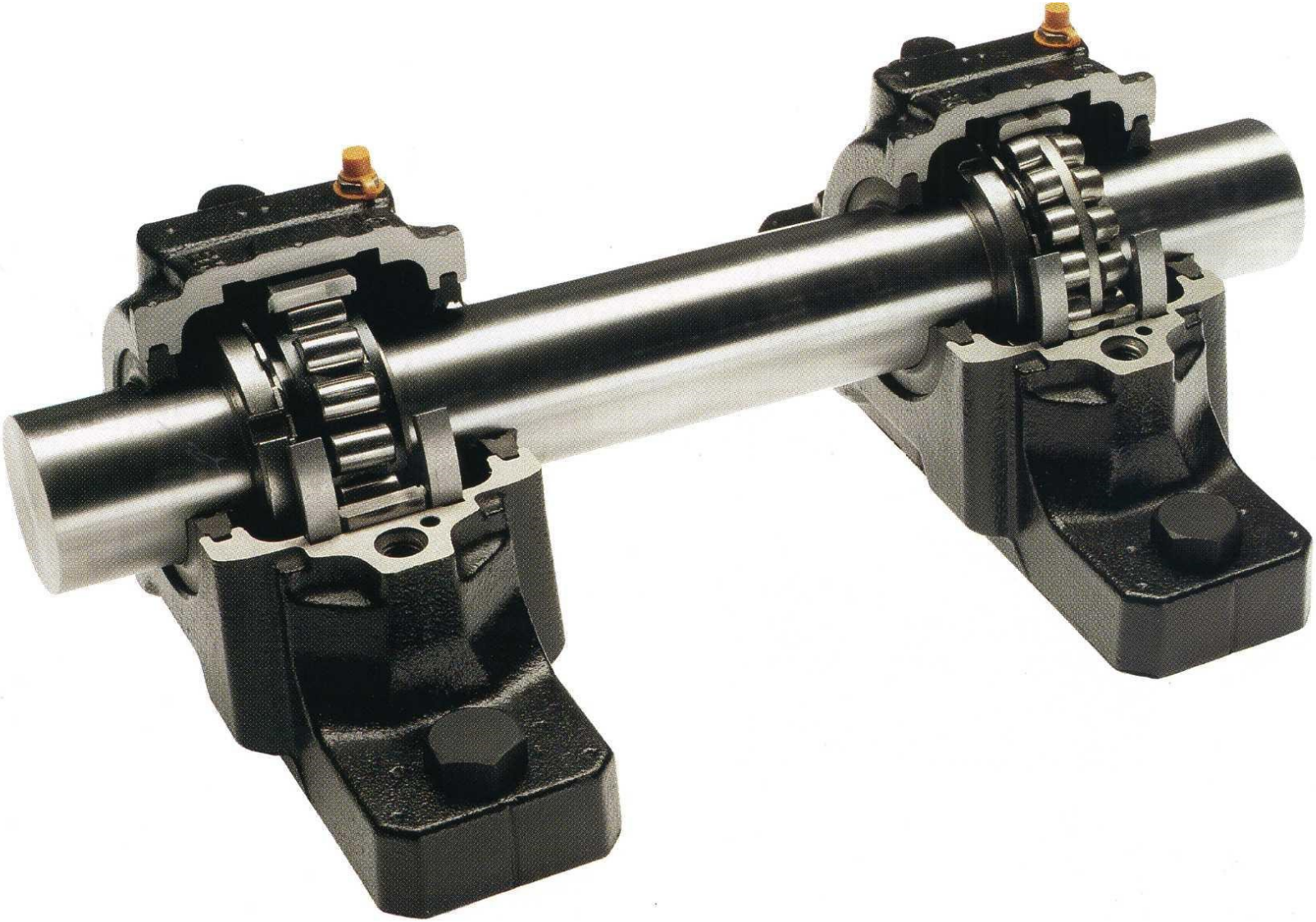
Los números límites de revoluciones n_g indicados en las tablas de los catálogos de rodamientos separadamente para lubricación con grasa y lubricación por aceite, tienen validez para la ejecución estandart del rodamiento, es decir, cuando los rodamientos radiales están sometidos a cargas puramente radiales y los rodamientos axiales están sometidos a pura carga axial. El número límite de revoluciones se determina de la siguiente ecuación:

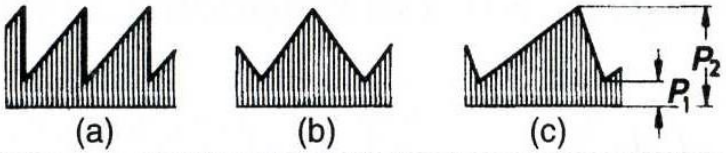
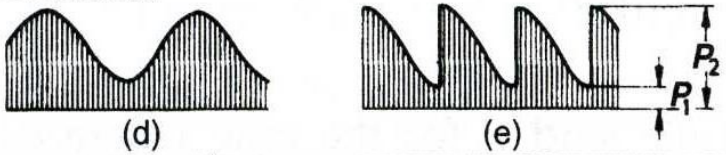
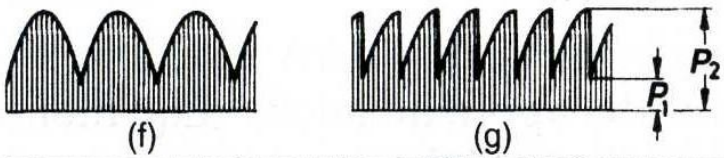
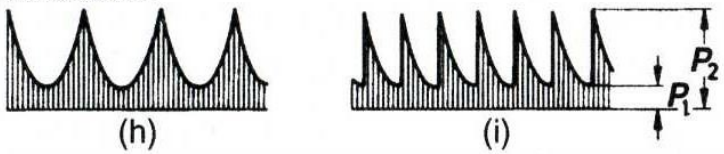
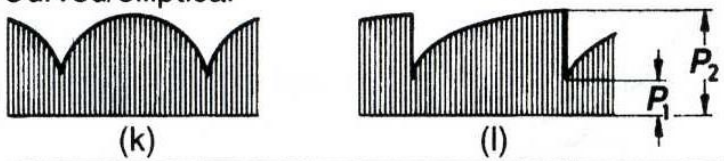
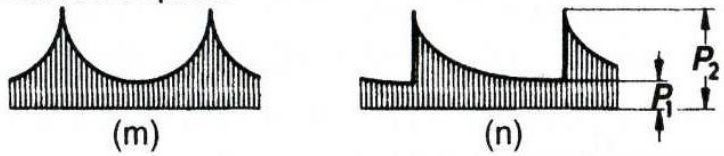
$$n_g = f_0 n$$



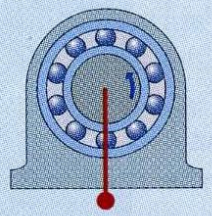
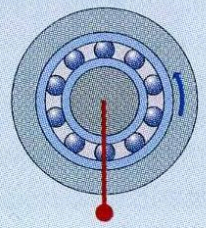
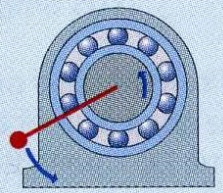
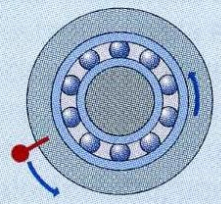
Cuadro 4.1: Clasificación de la carga P que actúa sobre un rodamiento

Carga	Rodamientos	
	Bolas	Rodillos
ligera	Hasta 0.07C	Hasta 0.08C
Normal	Myor a 0.07C	Mayor a 0.08C
	Hasta 0.15C	Hasta 0.18C
Alta	Mayor a 0.15C	Mayor a 0.18C
Extremadamente alta	Mayor a 0.25C	Mayor a 0.30C



Load pattern	Approximation
Linear 	$P = 0.63P_2 + 0.37P_1$
Sinusoidal 	$P = 0.68P_2 + 0.32P_1$
Sinusoidal 	$P = 0.75P_2 + 0.25P_1$
Sinusoidal 	$P = 0.55P_2 + 0.45P_1$
Curved/elliptical 	$P = 0.84P_2 + 0.16P_1$
Curved/elliptical 	$P = 0.38P_2 + 0.62P_1$

Condiciones de giro y carga

Condiciones de funcionamiento	Ilustración esquemática	Condición de carga	Ejemplo	Ajustes recomendados
Aro interior rotativo Aro exterior estacionario Carga de sentido constante		Carga rotativa en el aro interior Carga estacionaria en el aro exterior	Ejes de transmisión por correa	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior
Aro interior estacionario Aro exterior rotativo Carga de sentido constante		Carga estacionaria en el aro interior Carga rotativa en el aro exterior	Rodillos de cintas transportadoras Rodamientos de cubos de rueda	Ajuste flojo para el aro interior Ajuste de interferencia para el aro exterior
Aro interior rotativo Aro exterior estacionario La carga gira con el aro interior		Carga estacionaria en el aro interior Carga rotativa en el aro exterior	Aplicaciones vibratorias Cribas vibratorias o motores	Ajuste de interferencia para el aro exterior Ajuste flojo para el aro interior
Aro interior estacionario Aro exterior rotativo La carga gira con el aro exterior		Carga rotativa en el aro interior Carga estacionaria en el aro exterior	Machacadoras giratorias (Transmisiones de transportadores)	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior

4.2.3. Temperatura

Los aros de los rodamientos y los cuerpos rodantes son fabricados de acero al cromo templado y endurecidos y revenidos hasta obtener los valores estandarizados. Con esta dureza los rodamientos logran las capacidades de carga indicadas para una temperatura de servicio constante de hasta 120°C y temperaturas punta de hasta 500°C.

Símbolo adicional	Temperatura de servicio °C	Factor de temperatura f_t
S0	150	1.00
S1	200	0.90
S2	250	0.75
S3	300	0.60

Figura 4.10: Símbolo adicional y factor de temperatura de servicio

Porqué se calienta un rodamiento?

- Calentamiento propio,
- Calentamiento exterior a través del eje, de la caja o por radiación,
- Superficie de refrigeración de la caja,
- Efecto refrigerante del eje,
- Efecto de ventilación de las partes vecinas,
- Temperatura de la atmósfera circundante,
- Tipo y cantidad de lubricante.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^k$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^k$$

$$L_{10s} = \frac{\pi D}{1000} L_{10}$$

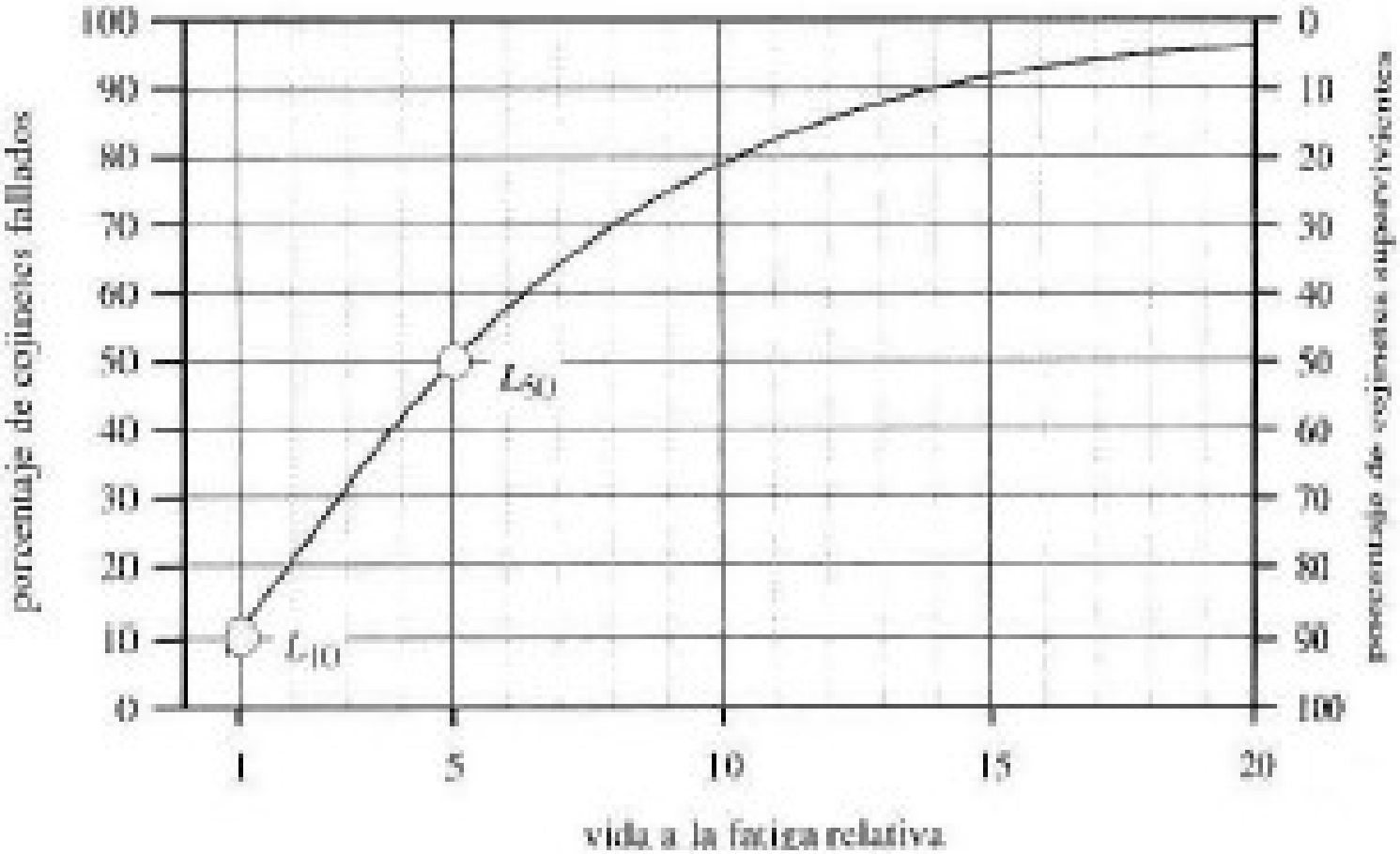


Figura 4.1: Estimación de vida estadística para rodamientos

- La vida del rodamiento es inversamente proporcional a su velocidad. El doble de velocidad, recortará su vida a la mitad

- La vida del rodamiento varía exponencialmente con la carga; duplicar la carga reduce la vida a 1/8

- Reduciendo la viscosidad de ISO VG 68 a ISO VG 32 se puede reducir la pérdida de potencia por viscosidad en un 25% (depende de la aplicación)

- Estudios de la industrias indican que hasta un 75% de las fallas de motores eléctricos están relacionadas con los rodamientos

- Los fabricantes estiman que el 95% de las fallas de los rodamientos son clasificadas como prematuras

- Un mantenimiento adecuado a los rodamientos tiene un impacto significativo en la confiabilidad del equipo y en la disponibilidad de la planta

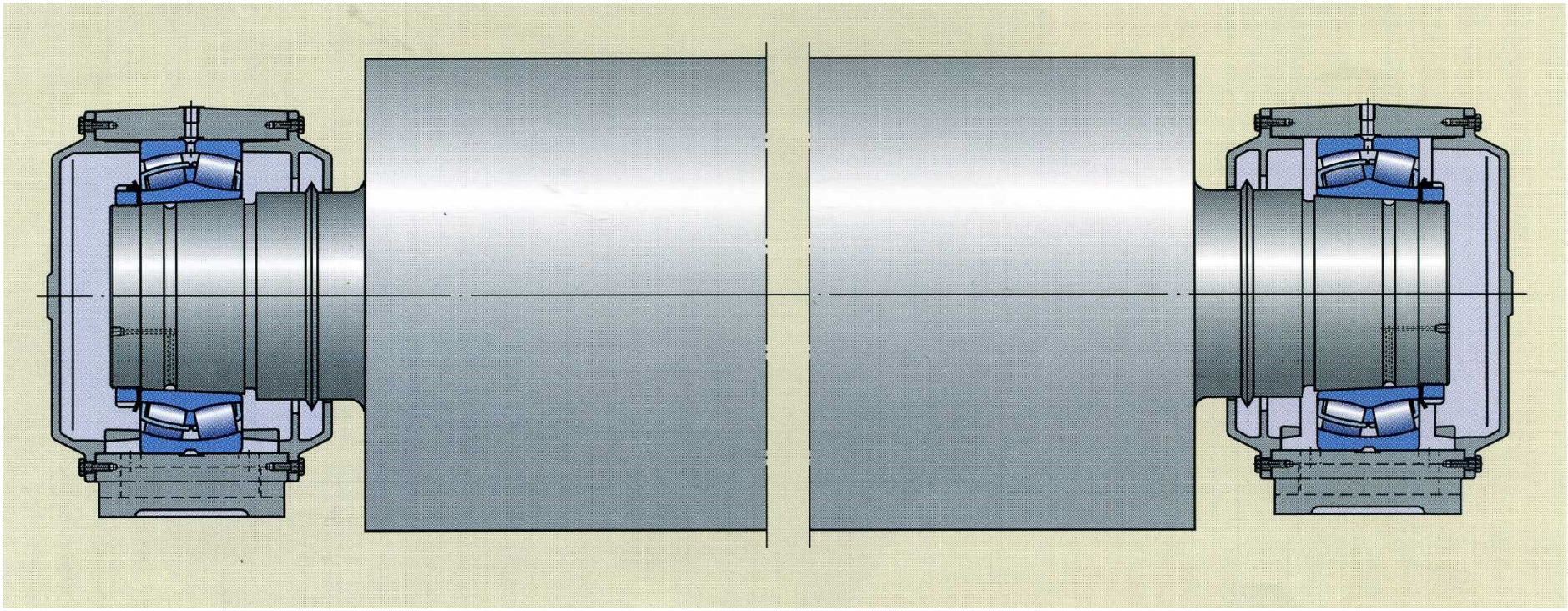
- La contaminación del lubricante es considerada frecuentemente como el factor más importante en la vida del rodamiento

Ventajas de la lubricación por grasa en comparación con la lubricación por aceite

- La construcción y el diseño son menos complejos.
- A menudo menor mantenimiento, al ser posible la lubricación de por vida
- Menor riesgo de fugas y juntas de estanqueidad más sencillas
- Eficaz obturación gracias a la salida de la grasa usada, es decir la "formación de cuellos de grasa"
- Con grasas para altas velocidades, cantidades de grasa dosificadas y un proceso de rodaje pueden obtenerse bajas temperaturas del cojinete a elevado número de revoluciones.

Desventajas de la lubricación por grasa en comparación con la lubricación por aceite

- No es posible la evacuación de calor.
- La película de grasa absorbe las impurezas y no las expulsa, sobre todo en el caso de lubricación con cantidades mínimas de grasa.
- Según el nivel actual de conocimientos, menores números límites de revoluciones o bien factores de velocidad admisibles en comparación con la lubricación por inyección de aceite y la lubricación por pulverización.



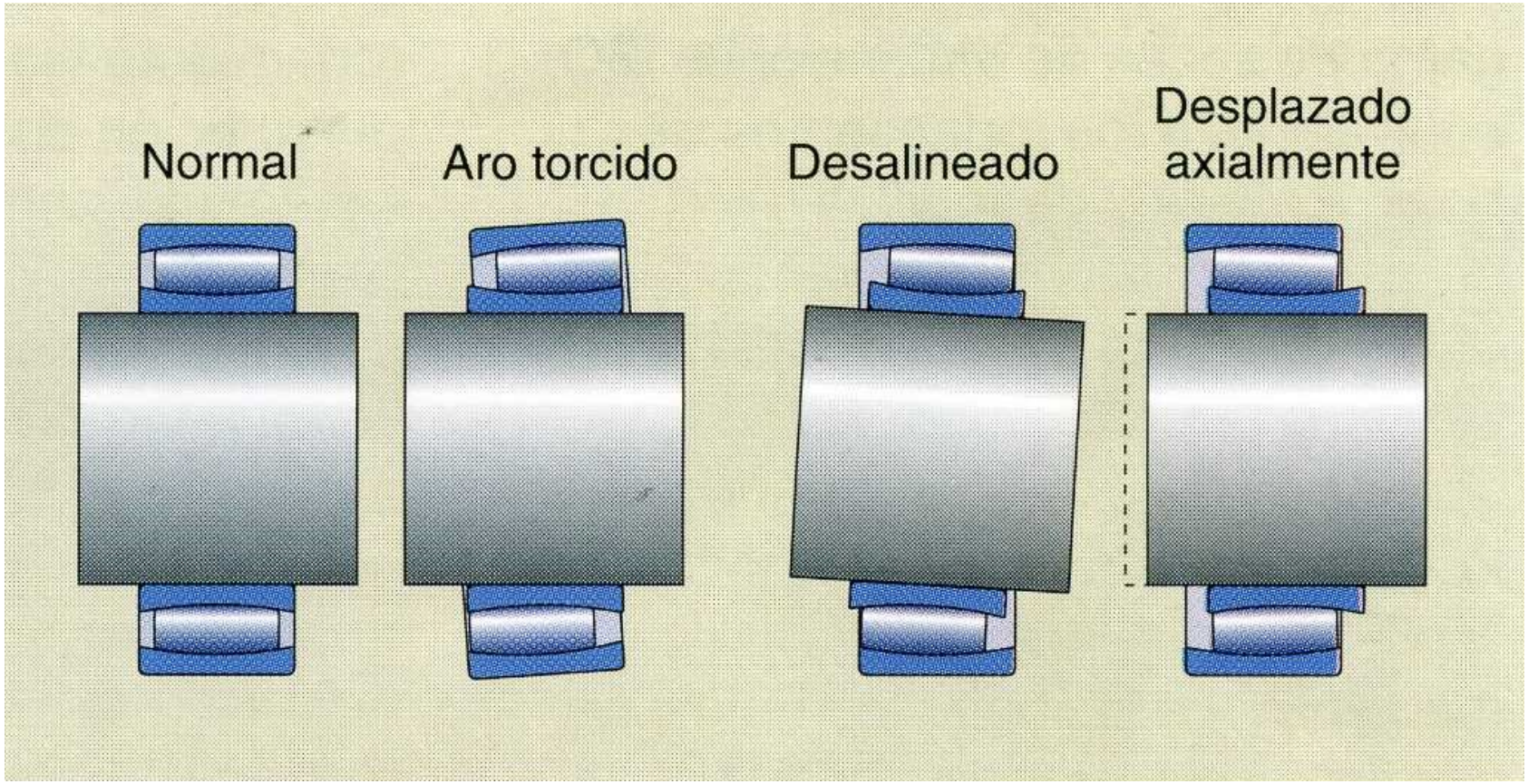

Normal
Aro torcido
Desalineado
Desplazado axialmente

TABLA 10.3.3 GUÍA DE LOS VALORES DE LA VIDA DE CAPACIDAD BÁSICA RECOMENDADAS

Clase de máquina	L_{10} Horas de servicio		
Máquinas domésticas, máquinas agrícolas, instrumentos, aparatos técnicos para uso médico	300	a	3 000
Máquinas usadas durante periodos cortos o intermitentes: herramientas eléctricas de mano, equipo de elevación en talleres, máquinas de construcción	3 000	a	8 000
Máquinas para trabajar con alta confiabilidad operacional durante periodos cortos o intermitentemente: Elevadores, grúas para artículos empacados o eslingas de tambores, fardos, etc.	8 000	a	12 000
Máquinas para usarlas 8 horas por día sin utilizarlas por completo: transmisiones de engranes para propósitos generales, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras rotatorias.	10 000	a	25 000
Máquinas para uso 8 horas por día y que se usan por completo: herramientas para maquinaria, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la energía, grúas para materiales a granel, abanicos de ventilador, bandas transportadoras, equipo de imprenta, separadoras y centrífugas	20 000	a	30 000
Máquinas para uso continuo 24 horas por día: unidades de engranes de laminadora, maquinaria eléctrica de tamaño mediano, compresores, malacate de mina, bombas, maquinaria textil	40 000	a	50 000
Maquinaria hidráulica, hornos rotatorios, máquinas torcedoras de cables maquinaria de propulsión para naves marítimas	60 000	a	100 000
Industria de la pulpa y el papel, maquinaria eléctrica pesada, plantas generadoras de energía, bombas en minas y abanicos de ventilador en minas, cojinetes para flechas de túneles para naves marítimas			=100 000

Fuente: SKF Industries, Inc., Bearings Group, King of Prussia, PA.

Table 13.6. Typical Rolling Bearing Design Life

Machine or Application Type	Life, hr
Blowers	30,000
Compressors	50,000
Continuous-duty cranes	30,000
Continuous-duty shipboard equipment	150,000
Conveyors and elevators	10,000
Door actuators	500
Farm machinery	4,000
Foundry and assembly cranes	8,000
General-purpose gearboxes	20,000
Machine tools	30,000
Mine hoists	50,000
Mine pumps	150,000
Public power stations	200,000
Public pumping-station equipment	200,000
Pulp and paper machines	100,000
Pumps	50,000
Single-screw extrusion equipment	100,000
Stationary electric motors	20,000
Twin and multiple-screw extruders	50,000

Source: Power Trans. Design (Sept. 1990).

Table 13.7. Guide to Requisite Rating Life L_{10s} for Road and Rail Vehicles

Vehicle Use	L_{10s}, Millions of km
Wheel hub bearings for road vehicles	
Cars	0.3
Commercial vehicles, buses	0.6
Axlebox bearings for rail vehicles	
Railroad freight cars	0.8
Commuter trains, street cars	1.5
Railroad passenger cars	3
Traction motors	3–4
Railroad diesel and electric locomotives	3–5

Source: SKF (1999).

Parámetros de funcionamiento del rodamiento

Temperatura			
L =	baja	<50 °C / 122 °F	
M =	media	50 a 100 °C / 122 a 230 °F	
H =	alta	>100 °C / 212 °F	
EH =	extr. alta	> 150 °C / 302 °F	
Velocidad de los rodamientos de bolas			
EH =	extr. alta	por encima de 700 000 n.dm	
VH =	muy alta	hasta 700 000 n.dm	
H =	alta	hasta 500 000 n.dm	
M =	media	hasta 300 000 n.dm	
L =	baja	por debajo de 100 000 n.dm	
Velocidad para rodamientos		**SRB/TRB/CARB***	**CRB**
H =	alta	por encima de 210 000 n.dm	por encima de 270 000 n.dm
M =	media	hasta 210 000 n.dm	hasta 270 000 n.dm
L =	baja	hasta 75 000 n.dm	hasta 75 000 n.dm
VL =	muy baja	por debajo de 30 000 n.dm	por debajo de 30 000 n.dm
Carga			
VH =	muy alta	C/P < 2	
H =	alta	C/P ~ 4	
M =	media	C/P ~ 8	
L =	baja	C/P 15	

4.3.6. Características del aceite

Para que un aceite cumpla adecuadamente con sus funciones, debe tener las siguientes características:

- Viscosidad correcta
- Adecuado índice de viscosidad
- Buena resistencia a la oxidación
- Buenas propiedades anticorrosivas y antiherrumbe
- Buenas propiedades antiemulsionantes
- Buenas propiedades antidesgaste (y de EP si se requiere)

Otras propiedades como punto de inflamación, punto de fluidez, número de neutralización, y residuos de carbón Conradson, son importantes para aplicaciones más específicas.

4.3.7. Viscosidad del aceite requerido

Se debe calcular correctamente debido a que viscosidades demasiado altas originan peligrosas elevaciones de temperatura y viscosidades demasiado bajas no permiten que se forme una película lubricante lo suficientemente gruesa como para impedir el contacto metálico entre los diferentes elementos del rodamiento.

La viscosidad del aceite a la temperatura de operación se calcula de la figura 4.28, conociendo la relación n/ng y el tipo de rodamiento. Con la viscosidad a la temperatura de funcionamiento se encuentra el grado ISO del lubricante.

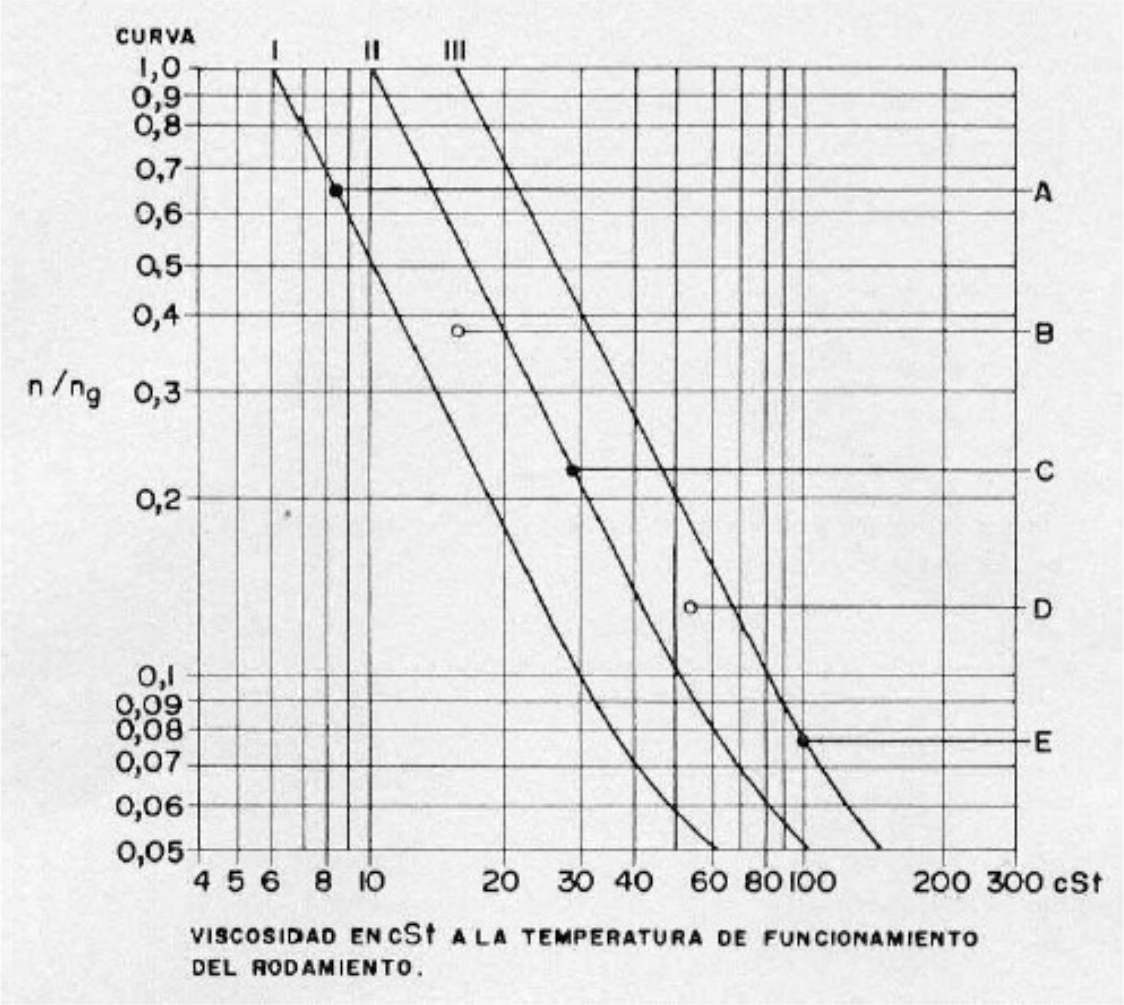


Figura 4.28: Cálculo de la viscosidad del aceite en cSt para lubricar un rodamiento

En el gráfico de la figura 4.28, A, B, C, D y E son las zonas que delimitan el tipo de rodamiento. Así:

- A : Rodamiento de rodillo cilíndrico cargado radialmente
- B : Rodamiento rígido de bolas, de contacto angular y de bolas a rótula.
  - Curva I para carga radial
  - Curva II para carga axial
- C : Rodamientos rígidos de doble hilera de bolas
- D : Rodamiento de rodillos cónicos y de rodillos a rótula
  - Curva II para carga radial
  - Curva III para carga axial
- E : Rodamientos axiales de bolas de simple efecto, axiales oscilantes de rodillos, axiales de rodillos cilíndricos y oscilantes de una hilera de rodillos

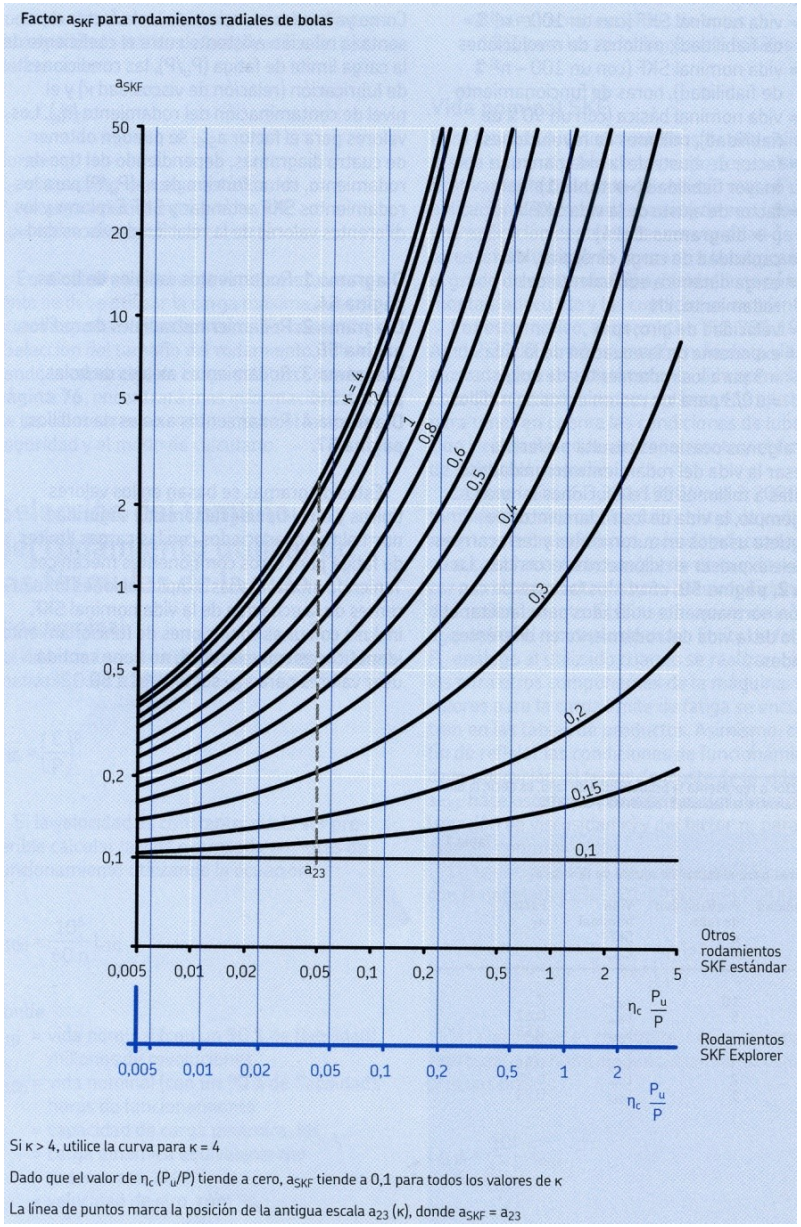
$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \ldots a_n L_{10}$$

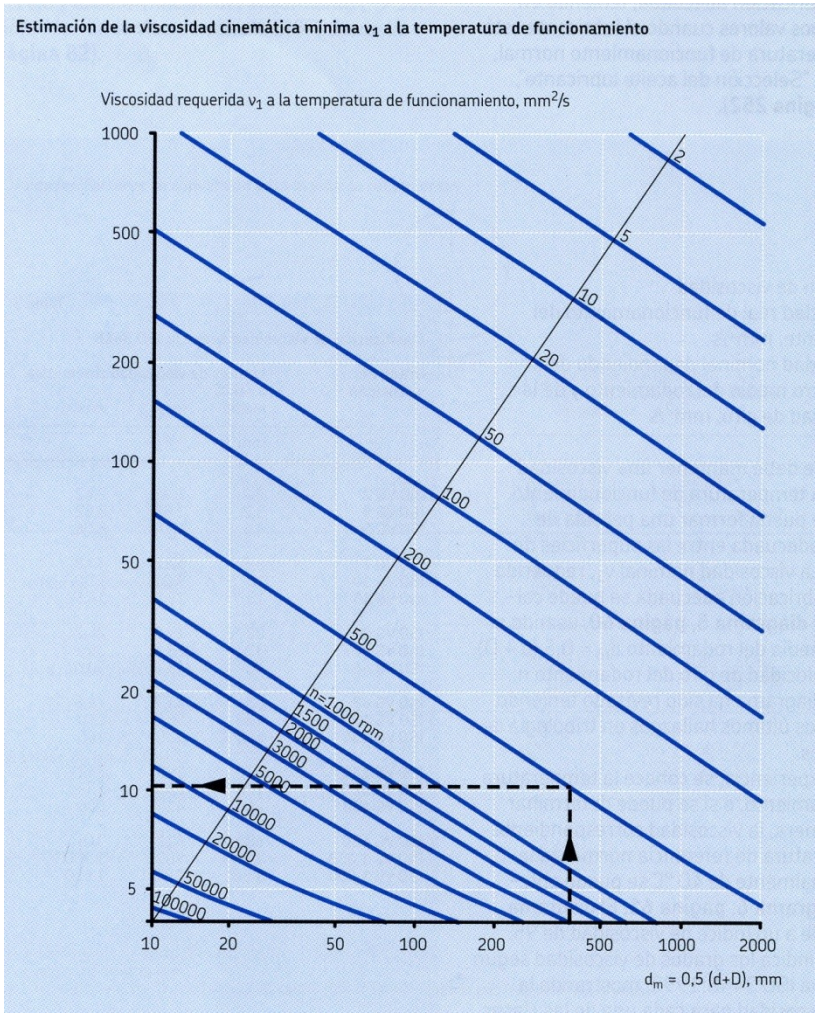
a_1 es el factor de ajuste de la vida por fiabilidad,

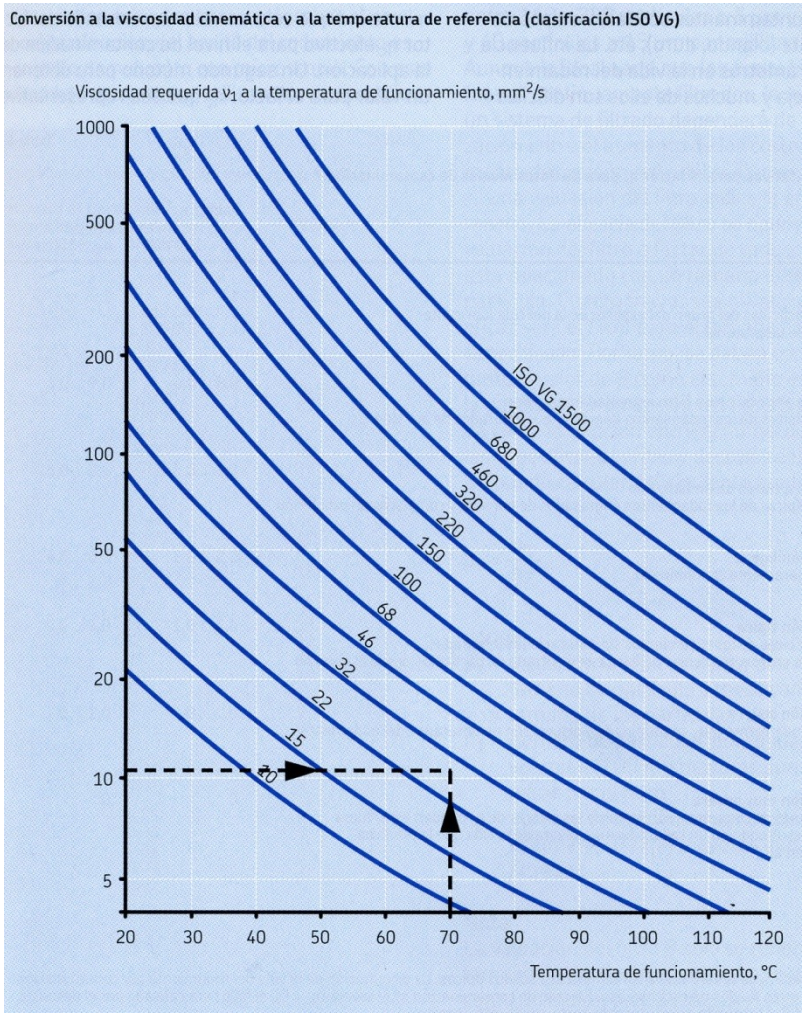
Fiabilidad %	L_{na}	a_1
90	L_{10a}	1.00
95	L_{5a}	0.62
96	L_{4a}	0.53
97	L_{3a}	0.44
98	L_{2a}	0.33
99	L_{1a}	0.21

ACEITES

CATALOGO SKF




Estimación de la viscosidad cinemática mínima ν1 a la temperatura de funcionamiento
Viscosidad requerida ν1 a la temperatura de funcionamiento, mm²/s
1000
500
200
100
50
20
10
5
2
5
10
20
50
100
200
500
n=1000 rpm
1500
2000
3000
5000
10000
20000
50000
100000
10
20
50
100
200
500
1000
2000
dm = 0,5 (d+D), mm


Conversión a la viscosidad cinemática ν a la temperatura de referencia (clasificación ISO VG)
Viscosidad requerida ν1 a la temperatura de funcionamiento, mm²/s
1000
500
200
100
50
20
10
5
ISO VG 1500
1000
680
460
320
220
150
100
68
46
32
22
15
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Temperatura de funcionamiento, °C

ACEITES - SKF

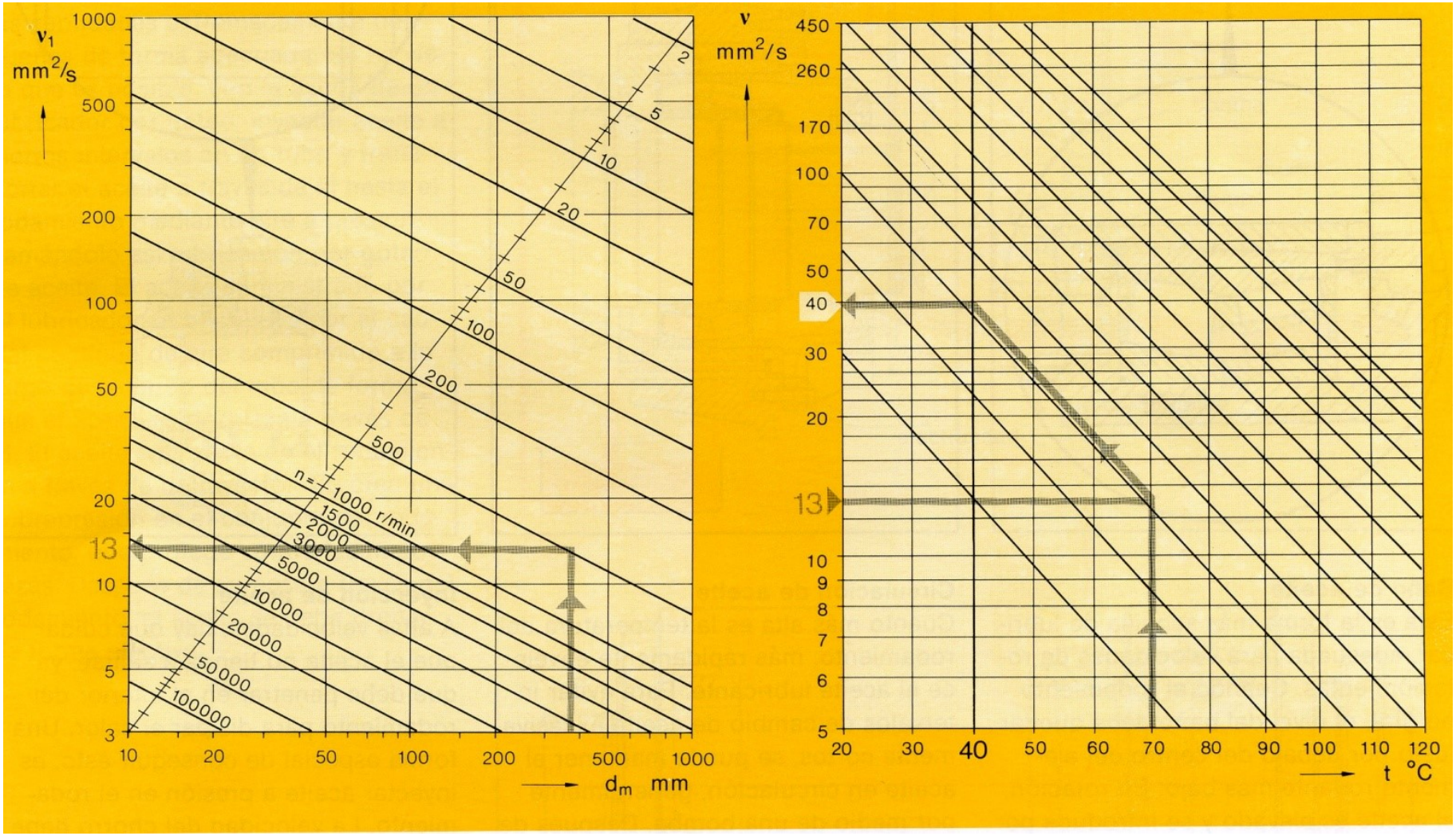

ν_1 mm²/s
1000
500
200
100
50
20
13
10
5
3
10
20
50
100
200
500
1000
d_m mm
2
5
10
20
50
100
200
500
n = 1000 r/min
1500
2000
3000
5000
10000
20000
50000
100000
ν mm²/s
450
260
170
100
70
50
40
30
20
13
10
9
8
7
6
5
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
t °C

Tabla 4

Valores orientativos para el factor η_c para distintos niveles de contaminación

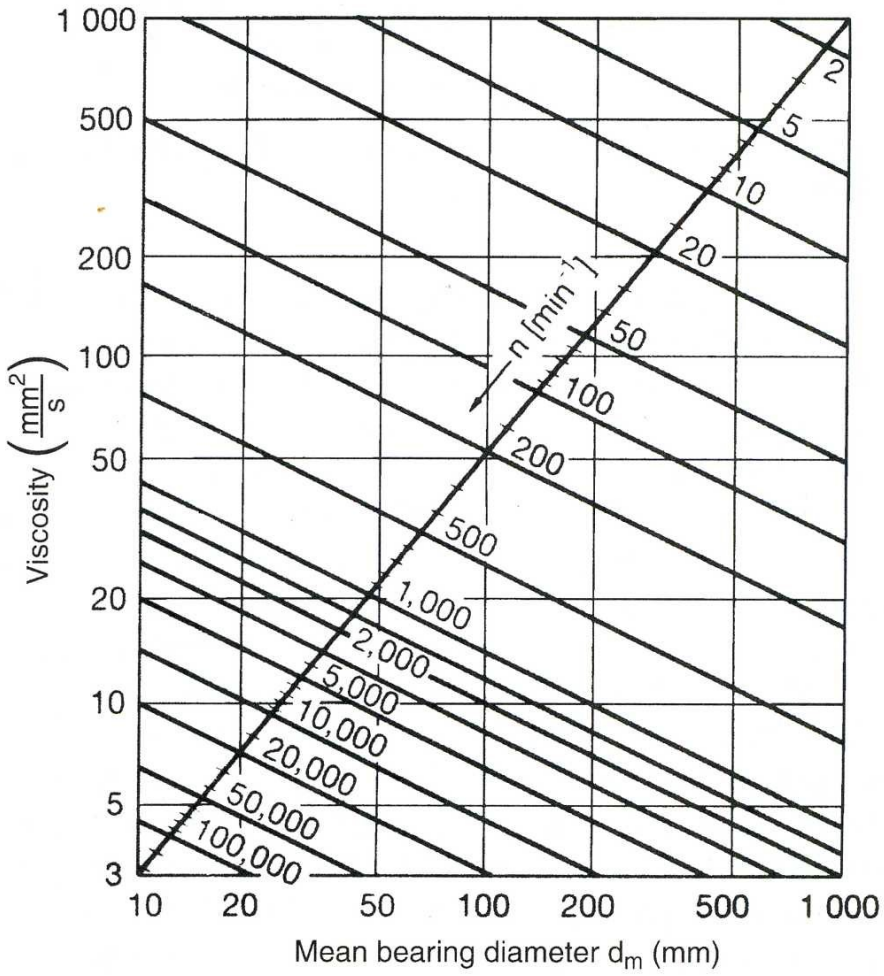
Condición	Factor η_c [1] para rodamientos con diámetro $d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
Muy limpio Tamaño de partículas del orden del espesor de la película lubricante Condiciones de laboratorio	1	1
Limpio Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados y obturados de por vida	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Normal Aceite filtrado a través de un filtro fino Condiciones típicas de los rodamientos engrasados de por vida y con placas de protección	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Contaminación ligera Lubricante ligeramente contaminado	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Contaminación típica Condiciones típicas de los rodamientos sin obturaciones integradas, filtros de paso grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas desde el entorno	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Contaminación severa Entorno del rodamiento muy contaminado y disposición no obturada adecuadamente	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Contaminación muy severa Bajo condiciones de contaminación extrema los valores de η_c pueden estar fuera de la escala resultando en un reducción más severa de la vida que la predicha por la ecuación L_{nm}	0	0

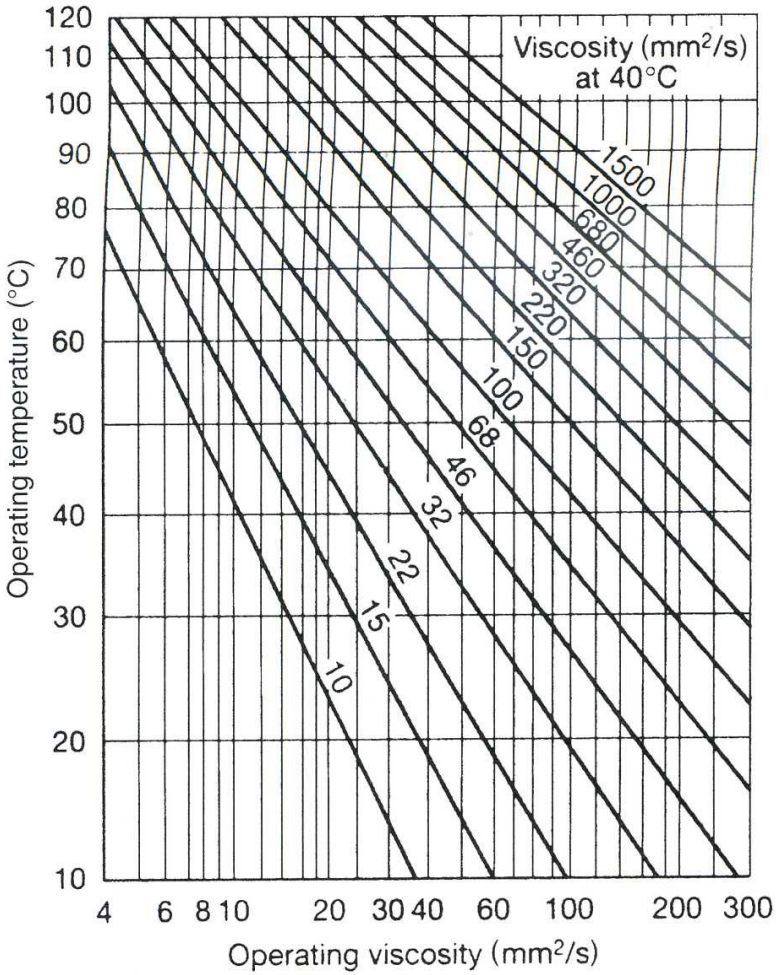
[1] La escala para η_c se refiere sólo a contaminantes sólidos típicos. La disminución de la vida del rodamiento por contaminación por agua u otros fluidos no está incluida. En caso de contaminación muy severa ($\eta_c = 0$), el fallo será causado por el desgaste, la vida útil del rodamiento puede ser más corta que la vida nominal.

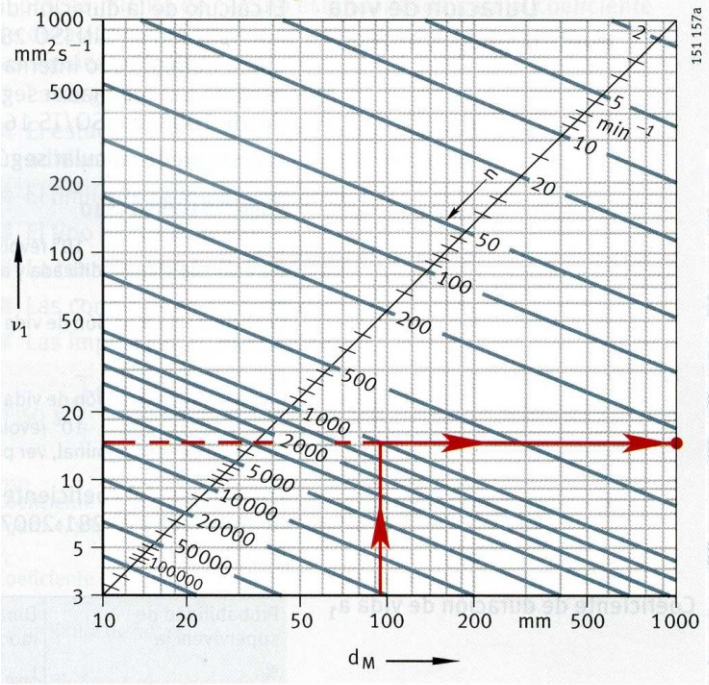
Contamination factor η_c for vibrating screens ①			
Sealing design	Grease lubrication	Oil bath	Circulating oil ②
Simple labyrinth or garter spring seal	0,001 - 0,1	0,05 - 0,15	Not recommended
Labyrinth with V-ring or garter spring seal	0,1 - 0,2	0,15 - 0,2	0,2 - 0,4
Multi-stage labyrinth with V-ring seal and grease purge	0,2 - 0,3	0,25 - 0,35	0,3 and greater

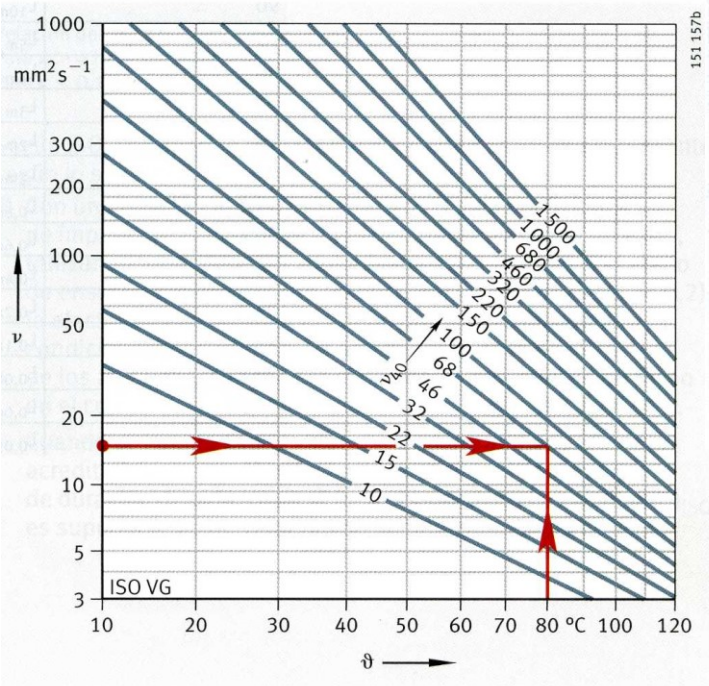
① The η_c value may vary depending on the operating conditions and maintenance performed

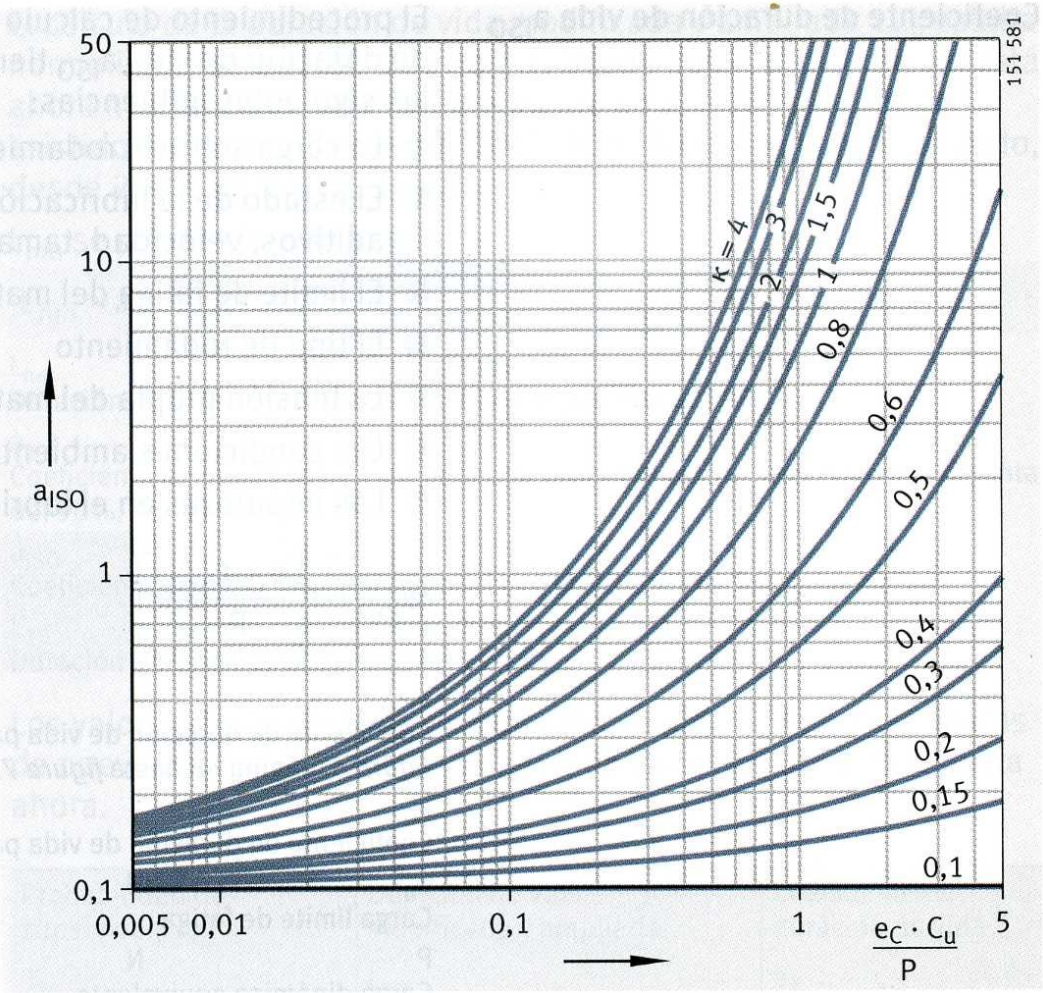
② Depends on the filtration rate. Oil loss may occur with poor sealing


1 000
500
200
100
50
20
10
5
3
Viscosity $\left(\frac{mm^2}{s}\right)$
10
20
50
100
200
500
1 000
Mean bearing diameter d_m (mm)
n [min⁻¹]
2
5
10
20
50
100
200
500
1,000
2,000
5,000
10,000
20,000
50,000
100,000

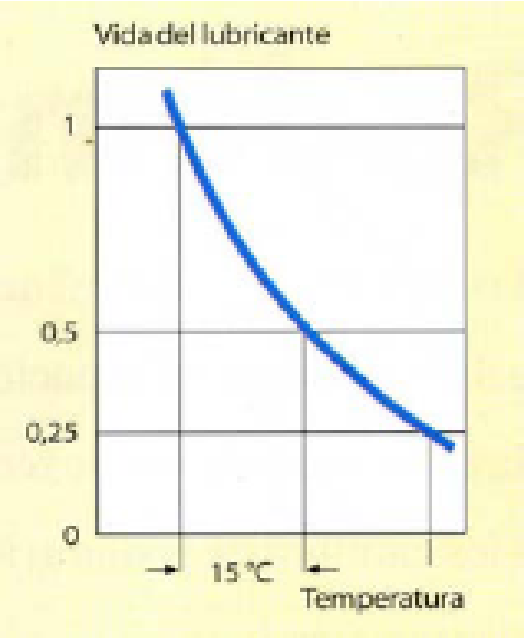

Viscosity (mm²/s)
at 40°C
1500
1000
680
460
320
220
150
100
68
46
32
22
15
10
Operating temperature (°C)
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
4
6
8
10
20
30
40
60
100
200
300
Operating viscosity (mm²/s)


151 157a
mm²s⁻¹
ν₁
n
min⁻¹
d_M
mm


151 157b
mm²s⁻¹
ν
ν₄₀
ISO VG
ϑ
°C

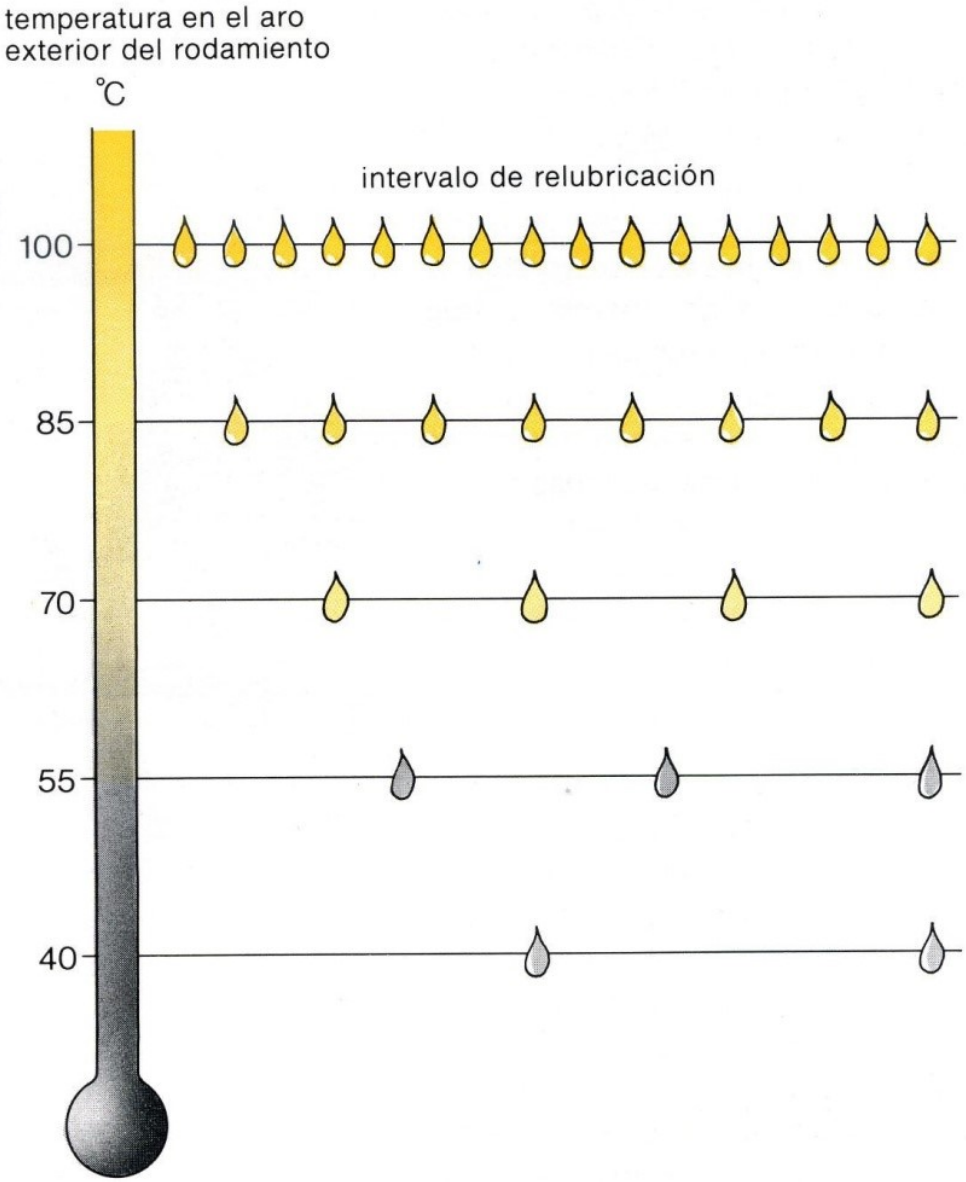

151 581
a_ISO
κ = 4
e_C · C_u / P

8. Es altamente inconveniente que la temperatura de operación sobrepase los 80ºC. Cada vez que esta temperatura de funcionamiento aumenta repercute directamente en la vida útil de todos los elementos internos, especialmente en engranajes y rodamientos.



ACEITES

SKF


temperatura en el aro
exterior del rodamiento
°C
intervalo de relubricación
100
85
70
55
40

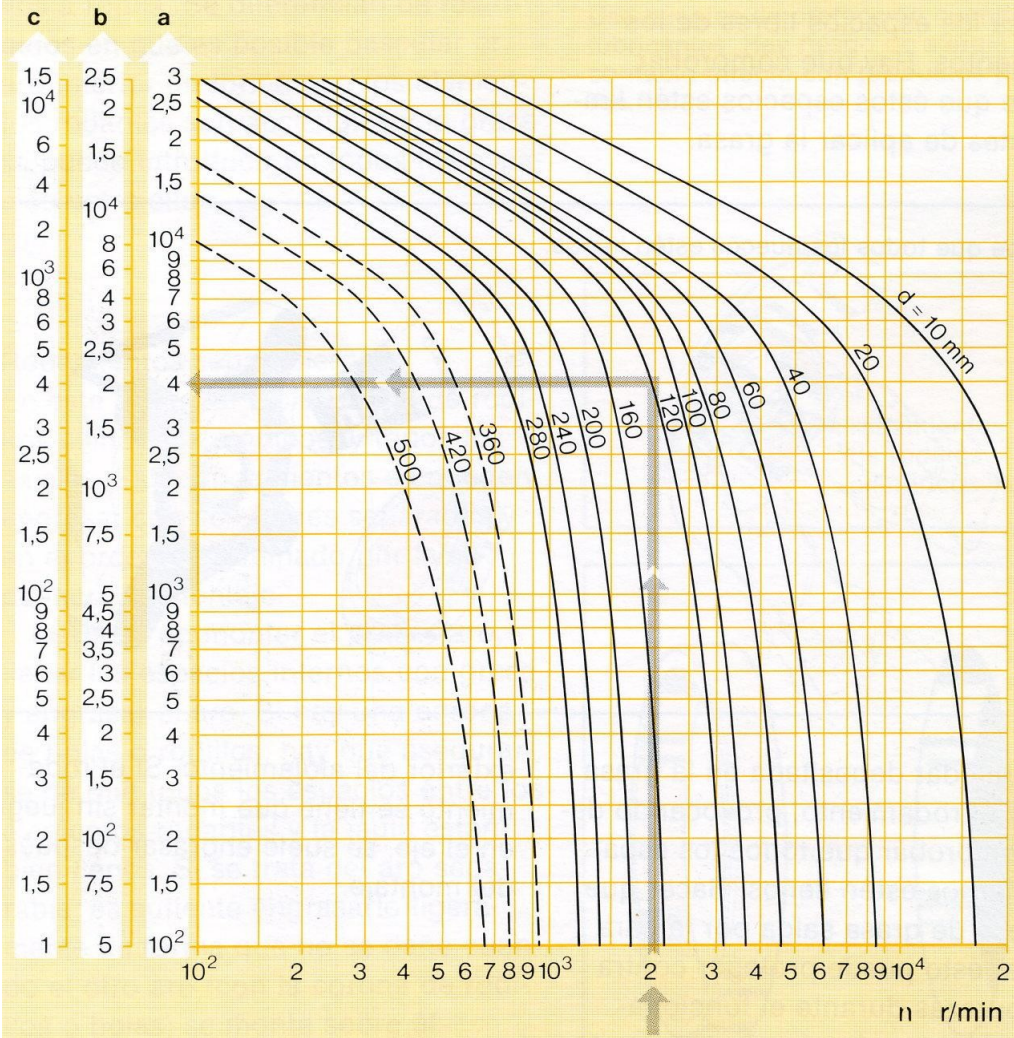
4.3.5. Lubricación por aceite

Un rodamiento se lubrica con aceite cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Elevadas temperaturas de funcionamiento y se necesite un buen efecto refrigerante. En este caso, la mayor parte del aceite se utiliza para la evacuación del calor,
- Se requiera evacuar contaminantes,
- El factor de velocidad esté dentro de los límites establecidos para cada tipo de rodamiento (Ver figura 4.7)

Sin embargo, a pesar de las ventajas que tiene lubricar los rodamientos con aceite, es más difícil garantizar una adecuada estanqueidad de la cavidad donde van montados.

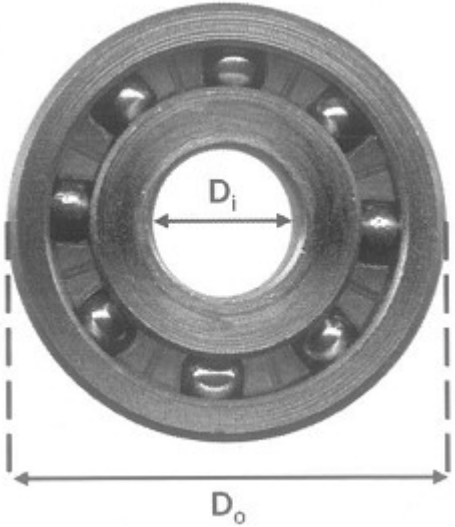
ACEITES - SKF



a Rodamientos radiales de bolas
b Rodamientos de rodillos cilíndricos, rodamientos de agujas
c Rodamientos de rodillos a rótula, de rodillos cónicos, axiales de bolas, de rodillos cilíndricos sin jaula llenos de rodillos (0,2 t_f), axiales de rodillos cilíndricos, axiales de agujas, axiales de rodillos a rótula (0,5 t_f)

El factor de velocidad del rodamiento es conocido comúnmente como el factor DN (velocidad angular en mm/min). Hay dos métodos para calcularlo:

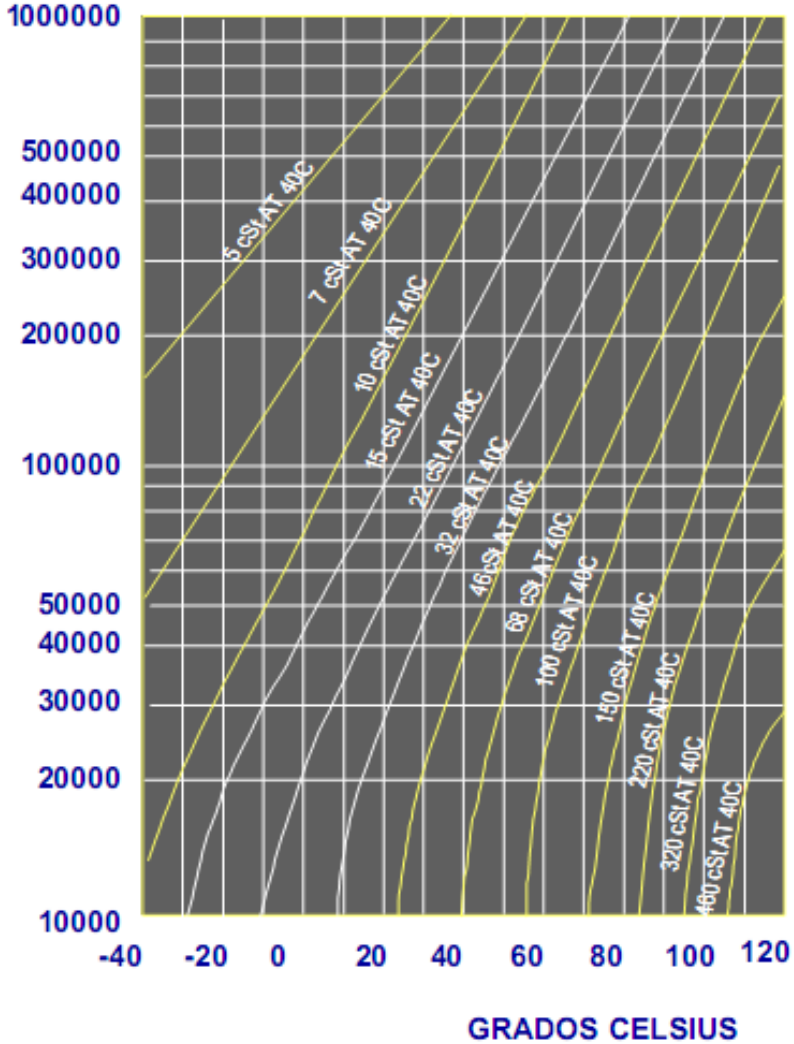
Método A	Método B
$\text{Factor } ND_m = \dfrac{N(D_i + D_o)}{2}$	$DN = D_i \times N$
N = Velocidad (rpm) D_i = Diámetro interior (mm)	D_o = Diámetro exterior (mm) D_m = Diámetro promedio (diámetro de contacto)



Factores influenciados por el factor de velocidad del rodamiento:

- Tipo de lubricante (aceite, grasa)
- Tipo de espesante de la grasa
- Concentración de espesante
- Número NLGI
- Viscosidad y tipo de aceite básico
- Aditivos (AW/EP)
- Temperatura de operación
- Nivel de llenado de grasa

Factor de Velocidad=dN



EJEMPLO:

- COJINETE DE 20 mm DE DIAMETRO.
- GIRANDO A 10.000 r.p.m.
- OPERANDO A 60 GRC.

Factor de Velocidad=dN=20x10,000=200,000

- SEGUN EL GRAFICO SE PUEDE USAR TANTO ISO 22 COMO 32.
- DEBIDO A LA VELOCIDAD OPERATIVA SE PREFIERE ISO 22.